

균열닫힘현상을 고려한 피로균열전파식 Fatigue Crack Growth Rate Equation by Crack Closure

김 용 수* 강 동 명** 신 근 하***
Yong-Soo Kim, Domg-Myeong Kang, Kuen-ha Shim

ABSTRACT

We propose the crack growth rate equation which will model fatigue crack growth rate behavior such that constant stress amplitude fatigue crack growth behavior can be predicted. Constant stress amplitude fatigue tests are conducted for four materials under three stress ratios of $R=0.2$, $R=0.4$ and $R=0.6$. Materials which have different mechanical properties i.e. stainless steel, low carbon steel, medium carbon steel and aluminum alloy are used. Through constant stress amplitude fatigue test by using unloading elastic compliance method, it is confirmed that crack closure is a close relationship with fatigue crack propagation. We describe simply fatigue crack propagation behavior as a function of the effective stress intensity factor range ($\Delta K_{eff}=U \cdot \Delta K$) for all three regions (threshold region, stable region).

The fatigue crack growth rate equation is given by

$$da / dN = A(\Delta K_{eff} - \Delta K_0)^m / (\Delta K_{cr} - \Delta K)$$

Where, A and m are material constants, and ΔK_0 is stress intensity factor range at low ΔK region. K_{cr} is critical fatigue stress intensity factor.

1. 서 론

공업이 발전 하면서 산업 구조물이 대형화되고 사용되는 재료 또한 다양해짐에 따라 장기간에 걸쳐

손상이 누적되는 피로파괴 거동에 의한 안전설계의 중요성이 더욱 요구된다. 일정응력진폭 피로시험을 행하면 대개 삼단계의 영역 (threshold region, stable region, unstable region)으로 나누어지는데 이러한 피로균열성장속도에 대한 해석은 부분적인 영역에 대해서 많은 이론들이 제안되어있다¹⁻⁶⁾. 그러나 피로균열성장거동의 공학적 응용 및 안전 설계에 있어서 피로수명 예측을 위해서는 다양한

* 正會員 : 서울산업대학 산업안전공학과

** 正會員 : 인하대학교 기계공학과

*** 正會員 : 아주대학교 기계공학과

재료에 대하여 피로균열 전파거동의 전체 영역을 나타낼 수 있는 피로균열전파식이 요구된다.

본 연구에서는 기계적성질이 다른 네가지 재료를 선택하고, 일정응력진폭시험을 세가지 경우의 응력비와 제하탄성 컴플라이언스법에 의하여 구한 균열단힘량을 토대로 실험식을 유도하였다.

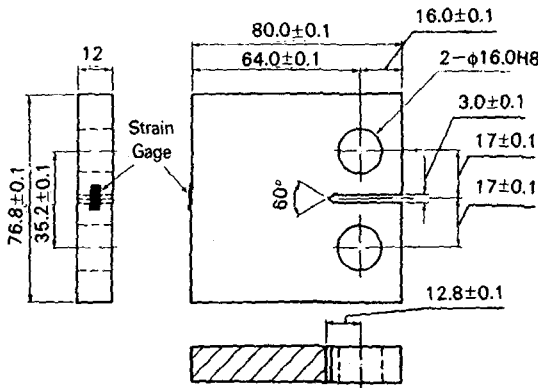


Fig.1 Fatigue Test Specimen(CT)

2. 시험편 및 실험절차

본 실험에 사용된 재료는 스테인레스강(304), 열간 압연강(50), 중탄소강(1020) 및 알루미늄(6061)이다. 시험편의 제작은 ASTM E647 규정에 의거 compact tension 시험편을 wire cutting machine에서 straight thru형으로 가공하였고 그 형상은 Fig.1과 같다. 피로시험의 수행에는 많은 시간과 인적노력이 필요하므로 피로연구의 효율화와 정밀화를 위해서 Fig.2와 같이 A/D-D/A 변환기를 이용한 피로시험장치를 구성하였다.

본 피로시험 측정장치에 사용된 컴퓨터 및 변환기의 특성은 Table 1과 같다.

인장시험을 행하여 재료들의 기계적성질을 구하였으며 그 값들은 Table 2와 같다. 피로시험은 일정응력진폭시험이며 응력비(R)는 세가지 조건 즉, R=0.2, R=0.4 및 R=0.6으로 실험을 행하였다. 제하탄성 컴플라이언스법(unloading elastic compliance method)에 의한 균열단힘량은 Fig.1과 Fig.2에서와 같이 CT 시험편의 배면에 스트레인게이지를

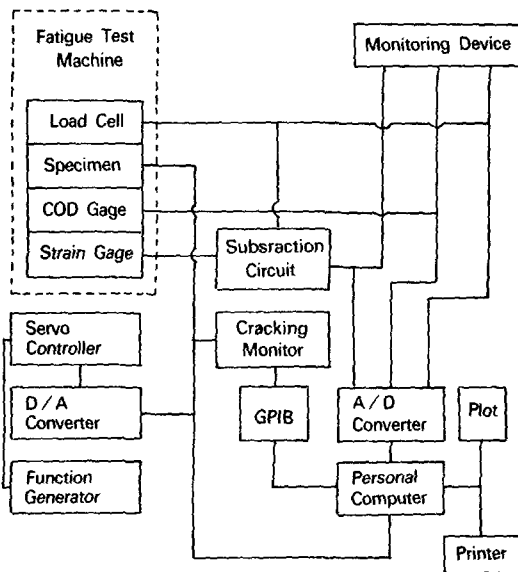


Fig.2 Block Diagram of Experimental Measurement

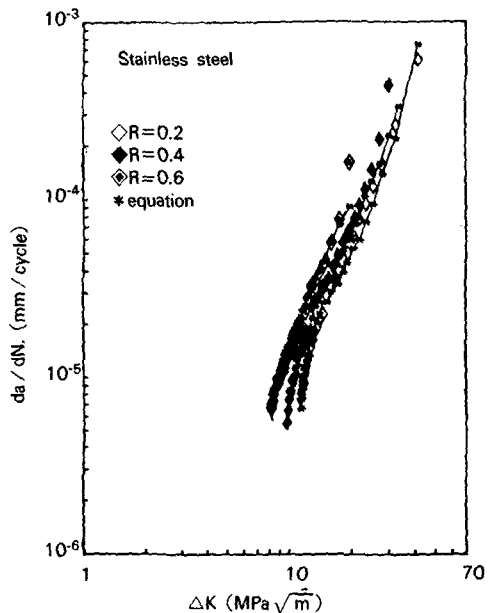


Fig.3 Fatigue Crack Growth Rate vs. SIF Range

Table 1. Characteristics of Computer and Converter

Personal Computer (IBM PC)	CPU : Intel 80286 Clock : 10 MHz ROM : 64kB RAM : 1MB
A / D Converter	Channel : 16CH Resolution : 12Bit Conversion Speed : 100kHz
D / A Converter	Channel : 2CH Resolutlion : 12Bit Settling Time : 5 Microsecond

부착하고 감산회로(substraction circuit)를 통하여 측정하였다⁷⁻⁸⁾. 피로시험의 파형으로는 20Hz의 Sine파를 택하였으며 각 시험편에 대한 하중조건들은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

일정응력진폭시험의 결과는 각 재료에 대하여 피로균열성장속도(da/dN)와 응력확대계수 폭(ΔK)과의 관계로 스테인레스강은 Fig.3, 열간 압연강은 Fig.4, 중탄소강은 Fig.5 및 알루미늄은 Fig.6에 각각 나타내었다. 각재료 공히 응력비가 클수록 피로균열성장속도가 커짐을 알 수 있다.

제한탄성 컴플라이언스법에 의한 결과는 균열

Table 2. Mechanical Properties

Properties	Young's Modulus	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation Percent	Poisson's Ratio
Materials	E(Mpa)	σ_{ys} (MPa)	σ_{ts} (MPa)	(%)	(ν)
Stainless Steel	2.01×10^5	250	650	70	0.30
Hot-rolled Steel	2.05×10^5	340	580	20	0.26
Carbom Steel	2.10×10^5	290	466	32	0.29
Aluminum	6.85×10^5	285	310	11	0.3

Table 3. Load Condition(Constant Stress Amplitude Test)

Material	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Stress Ratio (R)
Stainless Steel (304)	8.58	1.72	0.2
	9.16	3.66	0.4
	13.49	8.09	0.6
Hot-rolled Steel (50)	9.81	1.96	0.2
	11.28	4.51	0.4
	15.70	9.42	0.6
Carbon-Steel (1020)	9.81	1.96	0.2
	12.26	4.91	0.4
	17.17	10.30	0.6
Aluminum (6061)	4.66	0.93	0.2
	5.23	2.09	0.4
	6.38	3.83	0.6

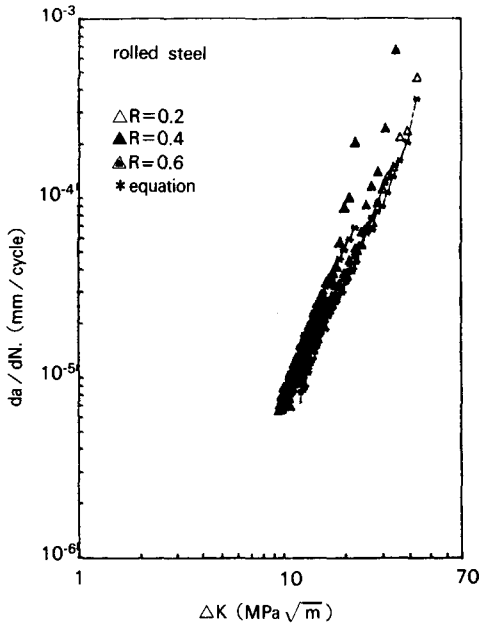


Fig.4 Fatigue Crack Growth Rate vs. SIF Range

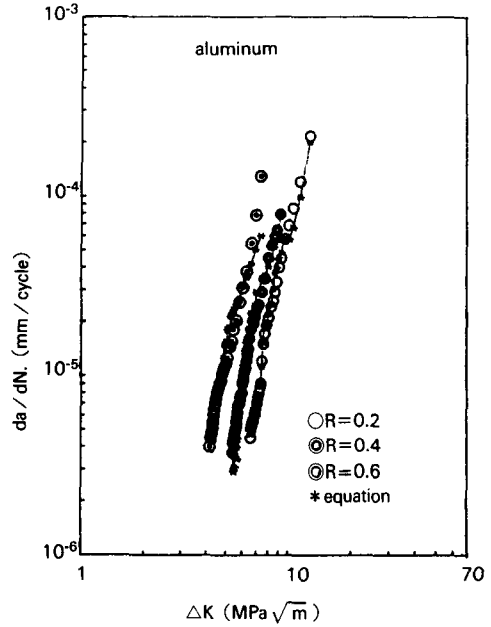


Fig.6 Fatigue Crack Growth Rate vs. SIF Range

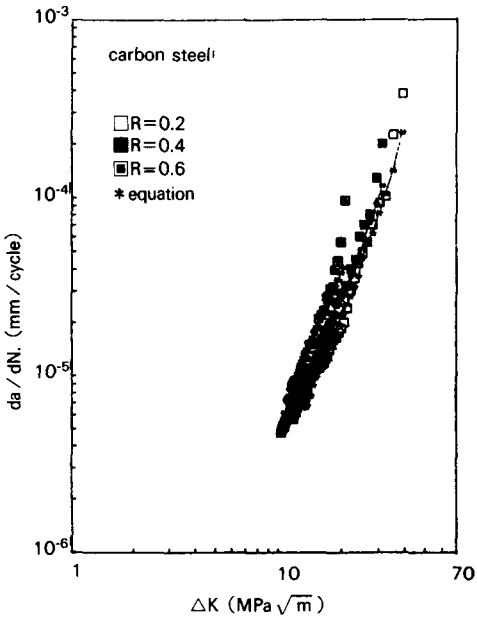


Fig.5 Fatigue Crack Growth Rate vs. SIF Range

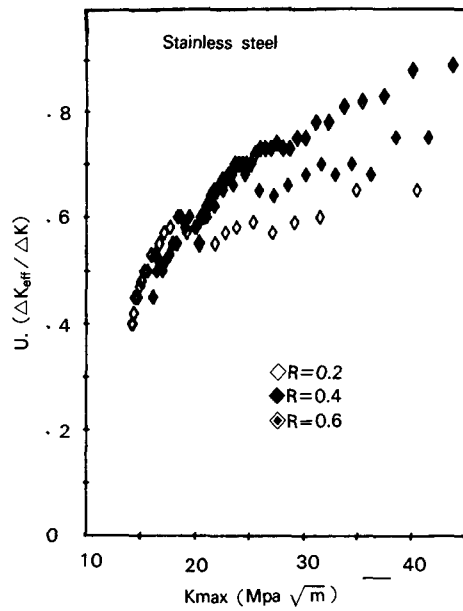


Fig.7 Crack Opening Ratio vs. Kmax

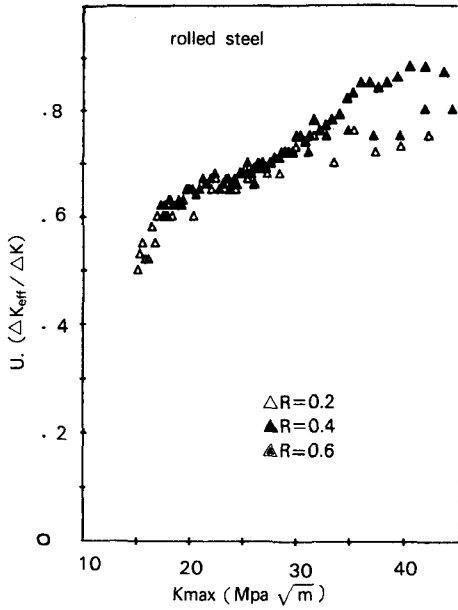


Fig.8 Crack Opening Ratio vs. Kmax

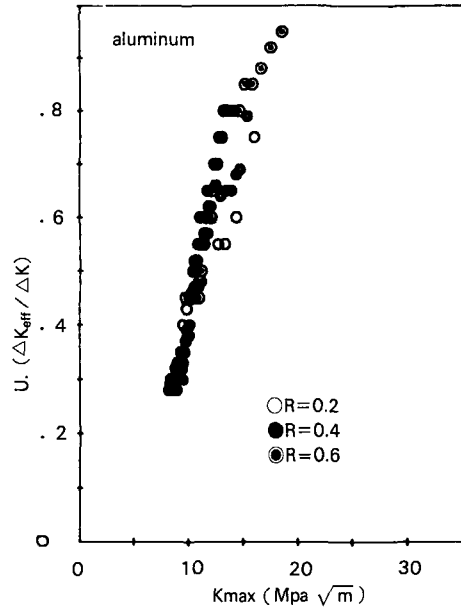


Fig.10 Crack Opening Ratio vs. Kmax

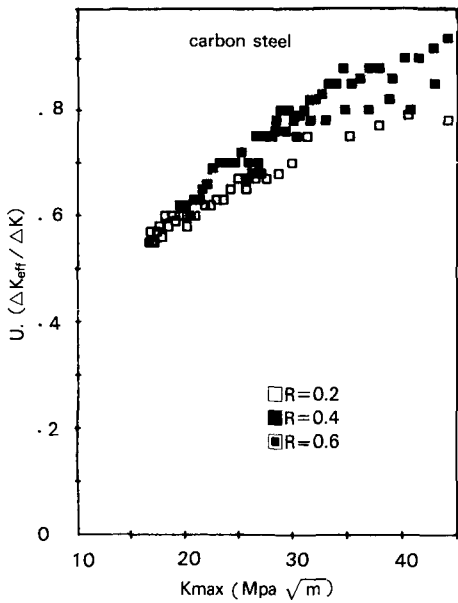


Fig.9 Crack Opening Ratio vs. Kmax

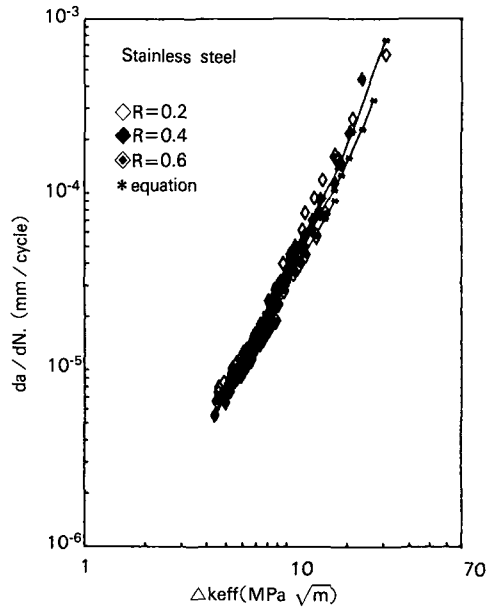


Fig.11 Fatigue Crack Growth Rate vs. ΔK_{eff}

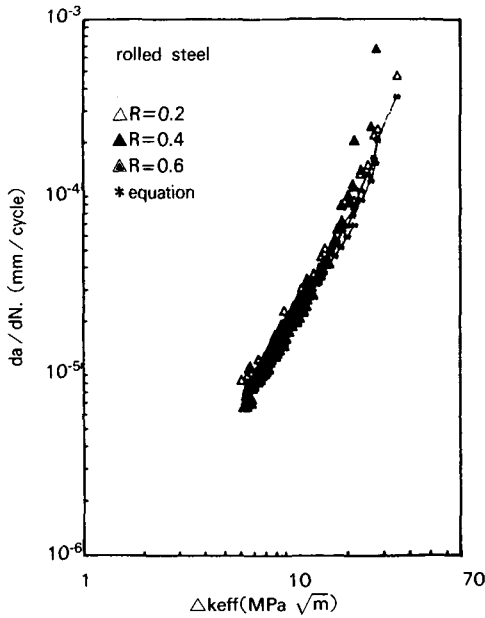


Fig.12 Fatigue Crack Growth Rate vs. ΔK_{eff}

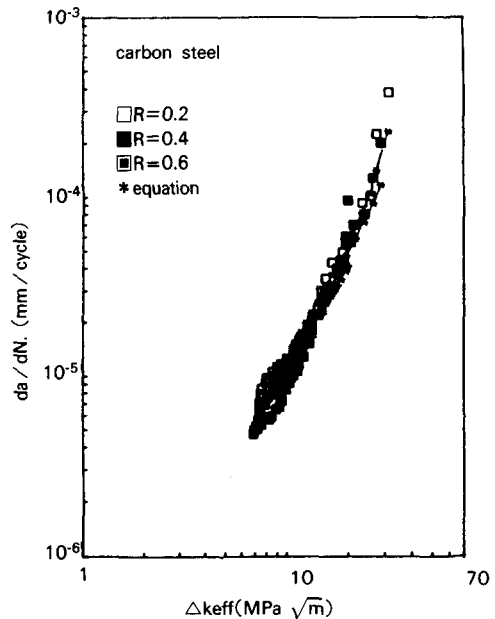


Fig.13 Fatigue Crack Growth Rate vs. ΔK_{eff}

개구율(crack opening ratio;U)과 K_{max} 의 관계로 각 재료에 대하여 Fig.7-Fing.10에 나타내었다. 여기서 균열 개구율은 $U = \Delta K_{eff} / \Delta K = (K_{max} - K_{op}) / \Delta K$ 이며 이들 그림에서 보는 바와같이 각 재료들은 K_{max} 의 증가에 따라 응력비가 클수록 균열 개구율이 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 K_{max} 의 증가에 따라 응력비가 클수록 균열단힘량이 작아짐을 의미하며 Kikugawa의 실험 결과와 일치하고 있다. 이것을 이용하여 Fig.11-Fig.14에는 각 재료에 대하여 피로 균열 성장속도(da/dN)와 유효응력확대계수(ΔK_{eff})와의 관계로 정리하였다. 이들 그림에서 알 수

있듯이 본 시험의 응력비 내에서 피로균열성장속도는 대체로 같은 선상으로 모여들을 알 수 있다. 이는 피로균열전파거동이 균열단힘량과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 이 경우에 적용할 수 있는 실험식을 제안하였다.

$$da/dN = A(\Delta K_{eff} - \Delta K_0)^m / (\Delta K_{cr} - \Delta K)$$

여기서 A와 m은 재료상수이고 ΔK_0 는 응력비와 관계없이 threshold 영역에서의 응력확대계수이며 K_{cr} 는 임계 피로응력확대계수 즉, 피로파괴인성치이다.

Table 4에는 각 재료에 대하여 이들의 값을 표

Table 4. Material Constants

Material	A	m	Ko(MPa√m)	K _{cr} (Mpa√m)
Stainless Steel	2.60 E-04	1.31	2.0	54
Hot-rolled Steel	1.40 E-04	1.17	2.4	58
Carbon Steel	8.95 E-05	1.28	2.3	53
Aluminum	1.55 E-04	1.33	0.9	20

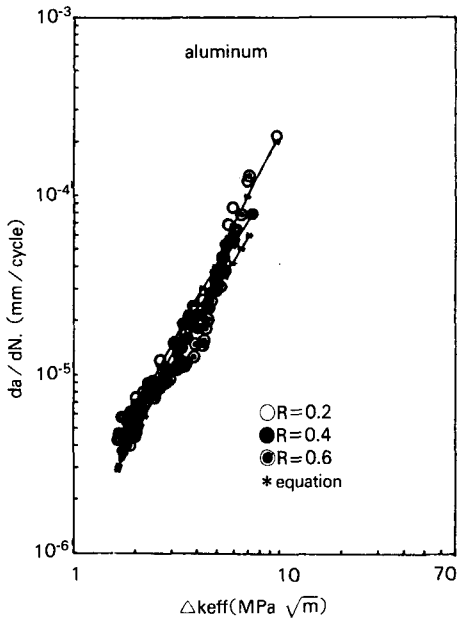


Fig.14 Fatigue Crack Growth Rate vs. ΔK_{eff}

시하였다.

제안된 실험식에 의한 결과는 각 재료에 대하여 피로균열 성장속도(da/dN)와 유효응력확대계수(ΔK_{eff})와의 관계로 Fig.11~Fig.14에 함께 나타내었고, Fig.3~Fig.6에는 피로균열 성장속도(da/dN)와 응력확대계수(ΔK)와의 관계로 정리하여 실험치와 함께 나타내었다. 그 결과 제안된 실험식은 각 재료에 대하여 비교적 잘 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

기계적성질이 상이한 스테인레스강, 열간 압연강, 중 탄소강 및 알루미늄합금 등의 재료에 대하여 제하탄성 컴플라이언스법에 의한 일정응력진폭시험의 결과 피로균열전과거동은 균열단합과 밀접한 관계가 있으며, 응력비가 0.2($R < 0.6$)의 범위와 균열 단합량을 고려하여 3단계 영역의 피로균열성장거동을 예견 할 수 있는 실험식을 다음과 같이 제안

하였다.

$$da/dN = A(\Delta K_{eff} - \Delta K_0)^m / (\Delta K_{cf} - \Delta K)$$

여기서 A와 m은 재료상수이고 ΔK_0 는 응력비와 관계없이 threshold 영역에서의 응력확대계수이며 K_{cf} 는 임계 피로응력확대계수 즉, 피로파괴인성치이다.

참 고 문 헌

- 1) Kocanda, S., 1978, "Fatigue Failure of Metals", Sijthoff and Noordhoff International Publishers, pp.241.
- 2) Forman, R. G. et al, 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Load Structure.", Trans. ASME J. Basic Engg. 9, pp.459.
- 3) Kraft, J.M., 1965, "On Prediction of Fatigue Crack Propagation Rate From Fracture Toughness and Plastic Flow Properties." Trans. ASM, 58, pp.691.
- 4) Elber, W., 1981, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230-
- 5) Rice, R.C., 1966, "Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue", ASTM STP 415, pp.241~311.
- 6) LAL, K.M. and Garg, S.B.L., 1974, "A Fatigue Crack Propagation Model for Strain Hardening Materials", Eng. Frac. Mech., Vol.9, Pergamond Press Print in Britain, pp.393~949.
- 7) Kikukawa, M., Jono, M., Tanaca, K., Kondo, Y. and Murata, Y., 1980, "Use of Mini-Computer for Accurate Automatic Measurement in Fatigue Test", J. Soc. Mater. Sci. Japan 29, pp.1240~1246.
- 8) Von EuW, E.F.J., Hertzberg, R.W., and Robbersts, R., 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 513 pp.230-242